

**О.И. Саблин, канд. техн. наук, А.И. Кийко, канд. техн. наук**

*(Украина, Днепропетровск, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна)*

## **ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

Около 50 % времени работы электротранспорта составляют так называемые эксплуатационные нестационарные (переходные) режимы, вызванные регулированием в широком диапазоне мощности тяговых средств. Неравномерное потребление электроэнергии на тягу приводит к колебаниям в широком диапазоне как тягового тока, так и напряжения на токоприемниках электроподвижного состава (ЭПС), имеющих вероятностный резкопеременный характер, что в свою очередь снижает точность учета расхода электроэнергии счетчиками постоянного тока, установленными на электровозах постоянного тока. Последнее вынуждает оценивать влияние нестационарного режима электропотребления ЭПС на точность учета расхода электроэнергии на тягу.

На электровозах и электропоездах постоянного тока для учета расхода электроэнергии установлены счетчики электродинамической системы, предназначенные для измерения энергии при постоянном токе и напряжении. Погрешность счетчиков данной системы, вызванная неравномерным электропотреблением, может быть отнесена к динамическому классу [1], что представляет собой составляющую общей погрешности, возникающей, когда измеряемая величина является функцией времени и зависит от инерционности средства измерения и других причин. Кроме этого, эта погрешность зависит как от свойств средства измерения, так и от характера изменения во времени измеряемой величины (наличия высокочастотных колебаний величины). Поскольку мгновенное напряжение на токоприемнике и тяговый ток ЭПС являются случайными процессами, то израсходованная на тягу электроэнергия счетчиком постоянного тока учитывается с погрешностью, представляющей собой реакцию счётчика на резкопеременный характер измеряемой величины. Известно [1], что динамическая погрешность средств измерений не может быть нормирована аналогично тому, как это делается в статическом режиме. Динамическая погрешность может быть нормирована лишь для конкретных (детерминированных) зависимостей  $x = F(t)$  измеряемой величины. Тогда для конкретной структурной схемы средства измерения может быть получена система дифференциальных уравнений, описывающих динамический режим каждого звена средства измерения, после решения которой может быть определена погрешность. Эта задача существенно усложняется при наличии в средстве измерения нелинейных звеньев, динамический режим которых описывается нелинейными дифференциальными уравнениями. Аналитического решения такая задача не имеет вовсе, если измеряемая величина представляет собой случайный процесс. В этом случае иссле-

дование динамических погрешностей может выполняться только методами теории случайных функций.

Как известно, для обеспечения точности измерений счетчики электроэнергии электровозов постоянного тока подвергаются обязательной периодической поверке. Стендовые поверки счетчиков в условиях локомотивных депо выполняют при стационарном режиме электропотребления (при неизменной нагрузке), что исключает проявление динамической погрешности, так как не учитываются особенности работы счетчика, а это, в конечном итоге при эксплуатации приводит к существенным расхождениям между реально израсходованной энергией и той, которая измеряется счетчиком.

При проверке погрешности  $\gamma$  счетчиков используют формулу

$$\gamma = \frac{C_{\text{н}} - C_{\text{д}}}{C_{\text{д}}} 100\% = \left( \frac{C_{\text{н}}}{C_{\text{д}}} - 1 \right) 100\% , \quad (1)$$

где  $C_{\text{н}}$  – номинальная постоянная счетчика, представляющая собой значение электроэнергии, зарегистрированной счетчиком за один оборот диска. Эта величина указывается на щитке счетчика (например, для счетчика типа Д621/1500 электровозов ЧС7 эта величина составляет 2 кВт·ч/об);  $C_{\text{д}}$  – действительная постоянная счетчика, под которой понимается количество энергии, действительно израсходованной в цепи за один оборот диска.

Величину  $C_{\text{д}}$  определяют по показаниям ваттметра (вольтметра-амперметра), секундомера и подсчету числа оборотов диска  $N$ :

$$C_{\text{д}} = \frac{Pt}{N} = \frac{UIt}{N} , \quad (2)$$

где  $U$  – напряжение, приложенное к потребителю (на катушке напряжения счетчика);  $I$  – ток, потребляемый из сети (ток токовой катушки счетчика).

Действительная постоянная  $C_{\text{д}}$  в отличие от  $C_{\text{н}}$  зависит от режима работы счетчика, колебаний токов и напряжений, а также от внешних условий, например, от температуры, частоты и т.д. При поверке счетчиков подсчитывают действительную постоянную для ряда неизменных нагрузок: 50, 100, 120 % от номинальной при  $U = \text{const}$ ,  $I = \text{const}$ .

Хотя напряжение на токоприемнике  $u$  (на катушке напряжения счетчика) и тяговый ток ЭПС  $i$  (протекающий через токовую катушку счетчика) – случайные функции, однако определим  $C_{\text{д}}$  не для любого  $t$ , а для времени одной реализации – поездки. В этом случае функции  $u(t)$ ,  $i(t)$  будут детерминированными процессами, а собственно  $u$  и  $i$  – случайными величинами. Тогда, учитывая, что в конкретной поездке ток токовой катушки и напряжение на катушке напряжения счетчика являются случайными величинами, то получаем, что действительная постоянная счетчика  $C_{\text{д}}$  будет также случайной величиной, яв-

ляющейся функцией двух случайных аргументов – напряжения на токоприёмнике и тягового тока ЭПС:

$$C_{\text{д}} = C_{\text{д}}(u, i). \quad (3)$$

Погрешность счетчика также будет случайной величиной. В соответствии с выражением (1) её можно представить функцией одного случайного аргумента  $C_{\text{д}}$ , а учитывая формулу (2), сложной функцией напряжения на токоприемнике и тягового тока, т.е.

$$\gamma = \gamma(C_{\text{д}}) = \gamma[C_{\text{д}}(u, i)]. \quad (4)$$

Зная вид реализаций случайных процессов  $u(t)$  и  $i(t)$  за поездку, их длительность, расход электроэнергии по счетчику и рассматривая воздействие  $u(t)$  и  $i(t)$  на счётчик как случайное, методами теории вероятностей определим основные числовые характеристики напряжения и тока, а по ним методом косвенных измерений [1] – основные числовые характеристики величин  $C_{\text{д}}$  и соответственно погрешности  $\gamma$  счетчика постоянного тока.

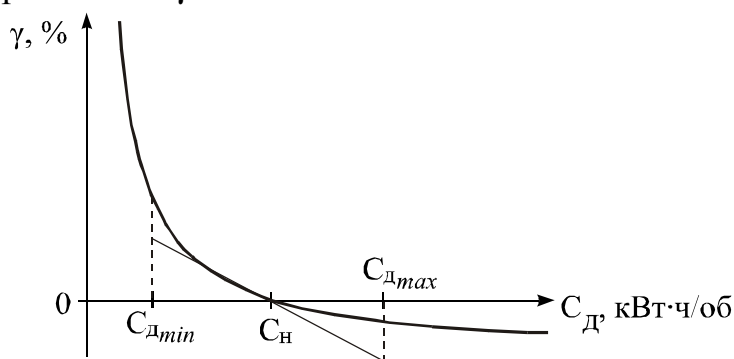


Рис. 1. Линеаризация зависимости  $\gamma = \gamma(C_{\text{д}})$

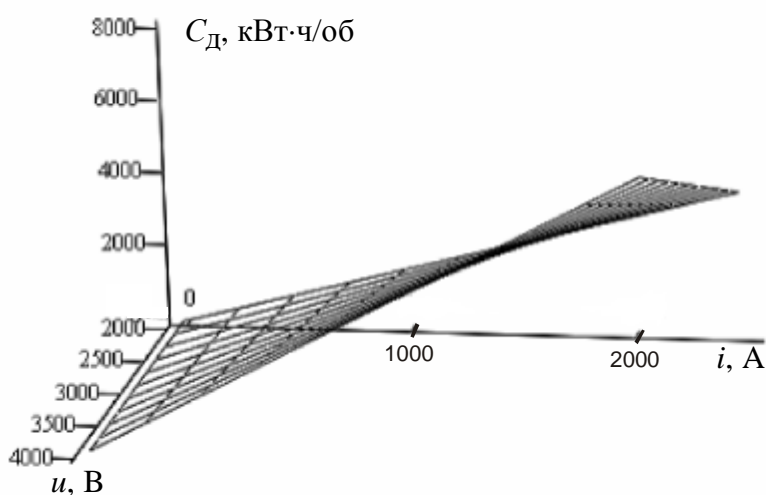


Рис. 2. Зависимость  $C_{\text{д}} = C_{\text{д}}(u, i)$  в области возможных значений аргументов  $u$  и  $i$  для счетчика Д621/1500 электровоза ЧС7

Поскольку зависимость  $\gamma = \gamma(C_d)$  согласно формуле (1) в диапазоне возможных значений  $C_d$  почти линейная (рис. 1), а все возможные значения случайной величины  $C_d$  группируются около номинальной постоянной  $C_H$  счетчика, указанной в паспорте, то для определения числовых характеристик величины погрешности  $\gamma$  применим метод линеаризации функций случайных величин [2]. Функция  $C_d = C_d(u, i)$  согласно выражению (2) в области возможных значений двух переменных  $u$  и  $i$  с достаточной степенью точности может быть представлена линейной (практически плоской) поверхностью (рис. 2).

Подставляя формулу (2) в (1), получаем

$$\gamma = \left( \frac{C_H N}{uit} - 1 \right) 100\% . \quad (5)$$

Согласно методу линеаризации [2] математическое ожидание линеаризированной функции (5) будет иметь следующий вид:

$$M[\gamma] = M \left[ \left( \frac{C_H N}{uit} - 1 \right) 100\% \right] = \left( \frac{C_H N}{M[ui]t} - 1 \right) 100\% = \left( \frac{C_H N}{(M[u]M[i] + K_{ui})t} \right) 100\% , \quad (6)$$

где  $K_{ui}$  – коэффициент корреляции случайных величин  $u$  и  $i$ .

Множитель  $C_H N / t$  может быть вынесен за знак математического ожидания, поскольку, как было сказано, длительность  $t$  одной поездки (реализаций  $u(t)$  и  $i(t)$ ) задана, а число оборотов диска счетчика за поездку известно. Для определения дисперсии погрешности  $\gamma$  найдем частные производные выражения (5) по аргументам  $u$  и  $i$  и подставим в полученные выражения вместо каждого аргумента их математические ожидания:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \gamma}{\partial u} \right|_M &= - \frac{C_H N}{u^2 it} 100\% \Big|_M = - \frac{C_H N}{(M[u])^2 M[i]t} 100\% ; \\ \left. \frac{\partial \gamma}{\partial i} \right|_M &= - \frac{C_H N}{ui^2 t} 100\% \Big|_M = - \frac{C_H N}{M[u](M[i])^2 t} 100\% . \end{aligned}$$

Тогда выражение для определения дисперсии величины погрешности запишется так:

$$D[\gamma] = \left( \left. \frac{\partial \gamma}{\partial u} \right|_M \right)^2 D[u] + \left( \left. \frac{\partial \gamma}{\partial i} \right|_M \right)^2 D[i] + 2 \left( \left. \frac{\partial \gamma}{\partial u} \right|_M \right) \left( \left. \frac{\partial \gamma}{\partial i} \right|_M \right) K_{ui} . \quad (7)$$

В результате расчета для ряда поездок электровоза ЧС7 получено, что математическое ожидание погрешности ( $M[\gamma]$ ) измерения расхода электроэнергии на тягу лежит в диапазоне  $-17...19\%$ , т.е. в некоторых случаях возможен недоучет ( $M[\gamma] < 0$ ) или переучет ( $M[\gamma] > 0$ ) счетчиком потребленной электроэнергии. Среднеквадратическое отклонение  $\sigma_\gamma$  величины погрешности  $\gamma$  находится в пределах  $58...62\%$ . Функция плотности распределения случайной величины  $f(\gamma)$  весьма сложная, значительно отличающаяся от распределения Гаусса.

Таким образом, при резкопеременном характере электропотребления ЭПС постоянного тока существенно возрастает погрешность электродинамических счетчиков, поэтому их показания малодостоверны.

#### Список литературы

1. Электрические измерения [Текст] / под ред. А. В. Фремке и Е. М. Душина. – Л.: Энергия, 1980. – 390 с.
2. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей [Текст] / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.  
УДК 621:316.925 (088.8)

*Рекомендовано до друку: професором Ивановим О.Б.*